



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

AKI GRÖNBLOM

YDINVOIMALAITOKSEN YKSISUUNTAVENTTIILIEN KUNNON-
VALVONTA

Kandidaatintyö

Tarkastaja: professori Pentti Saarenrinne. Tarkastaja ja aihe hyväksytty
15. syyskuuta 2017

TIIVISTELMÄ

AKI GRÖNBLOM: Ydinvoimalaitosten yksisuuntaventtiilien kunnonvalvonta.

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 26 sivua, 0 liitesivua

Tammikuu 2018

Teknisten tieteiden kandidaatin tutkinto

Pääaine: Energia- ja prosessitekniikka

Tarkastaja: professori Pentti Saarenrinne

Avainsanat: Yksisuuntaventtiili, ydinvoimalaitos, kunnonvalvonta.

Yksisuuntaventtiili on yleinen komponentti ydinvoimalaitostekniikassa. Suuren määrän-
sä vuoksi yksisuuntaventtiilien kunnonvalvonnalla on suuri merkitys kunnossapidon
kannalta. Usein venttiilin luotettavalla toiminnalla on myös merkitystä turvallisuuden
kannalta. Yksisuuntaventtiileiden käytön aikaisella kunnonvalvonnalla voidaan saavut-
taa taloudellisia hyötyjä ja parantaa turvallisuutta.

Tässä työssä on kirjallisuuden pohjalta tutkittu kolmen menetelmän käyttöä yksisuunta-
venttiilin kunnonvalvontaan. Koska venttiilit ovat tyyppihyväksytyjä rakenteita, joiden
rakenteeseen ei saa puuttua ilman uutta hyväksyntää, on tarkasteltavaksi valittu nimen-
omaan menetelmiä, joita voidaan käyttää ilman venttiilin rakenteen muuttamista.

Työssä on esitetty taustatietoa yksisuuntaventtiilien rakenteesta ja vikaantumismeka-
nismeista. Työssä on kirjallisten lähteiden perusteella tarkasteltu kolmea menetelmää:
Akustinen emissio, Ultraääni ja Sähkömagneettisen kentän havainnointiin perustuvat
menetelmät. Menetelmien soveltuvuutta on arvioitu perustuen kirjallisuudessa esitettyi-
hin johtopäätöksiin ja lisäksi on vertailtu eri menetelmillä saatavia hyötyjä suhteessa
venttiilien tyypillisiin vikaantumistapoihin.

Työn tuloksina on arvioitu menetelmillä saatavia hyötyjä eri vikaantumistapojen suh-
teen. Tuloksena voidaan pitää myös tietoa siitä, että valittaessa oikeaa mittaustapaa, on
tärkeää kyetä arvioimaan venttiilin mahdollisia vikaantumistapoja. Kaikilla menetelmil-
lä voidaan saavuttaa hyötyjä ja eri menetelmillä saatavat hyödyt eroavat toisistaan.
Akustinen emissio soveltuu erityisesti venttiilin mahdollisen vuotamisen valvontaan.
Ultraäänen etu on siitä saatava tieto venttiilin rakenteen kunnosta ja esimerkiksi vie-
rasesineiden havaitseminen. Sähkömagneettisilla menetelmillä voidaan saada helposti
tulkittavissa olevaa tietoa venttiilin asennosta.

ABSTRACT

AKI GRÖNBLOM: Condition monitoring of check valves in nuclear power plants.

Tampere University of Technology

Bachelor of Science Thesis, 26 pages, 0 Appendix pages

January 2018

Bachelor of science degree programme in technology

Major: Energy and process technology

Examiner: Professor Pentti Saarenrinne

Keywords: Check valve, Nuclear power plant, Condition monitoring.

The check valve is a common component in nuclear power plants. Because of their large amount there is large interest from the condition monitoring and safety point of view. Condition monitoring can be cost effective and could increase safety.

This thesis presents three condition monitoring methods. Check valve needs a specific approval in nuclear power plants. Therefore, they must be monitored without modifying the valve structure.

Check valve structures, typical failures and condition monitoring methods are studied from literature. There are three significant monitoring methods: acoustic emission, ultrasonic and electromagnetic method. Each method has their weaknesses and strengths detecting different failures on different check valve types.

This thesis evaluates the benefits of the methods regarding various failure types. It is also important to understand the check valve's failure mechanisms while choosing the proper monitoring method. All three methods are useful, but each method have their specific strengths. Acoustic emission is most suitable for leak detection. Ultrasonic method provides useful information about the condition of the valve structure. It can also be used to detect foreign objects. Electromagnetic method is suitable for detecting the position of the valve.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty kandidaatintyöksi Tampereen teknilliselle yliopistolle. Työssä on tarkasteltu mahdollisuuksia ydinvoimalaitoksen yksisuuntaventtiilin kunnonvalvonnan kehittämiseen.

Haluan kiittää Professori Pentti Saarenrinnettä haastavasta aiheesta ja Opintosuunnittelija Nina Ojalaa avusta työn alkuun ja loppuun saattamisessa.

Tampereella, 2.1.2018

Aki Grönlom

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	YKSISUUNTAVENTTIILIEN KULUMINEN JA VIKAANTUMINEN	2
2.1	Yksisuuntaventtiilin rakenne ja eri venttiilityypit	2
2.2	Yksisuuntaventtiilin ongelmat ja vioittumismekanismit	4
2.3	Yksisuuntaventtiilin vioittumisen aiheuttamat ongelmat	8
2.4	Yksisuuntaventtiilien käyttö ja vioittuminen ydinvoimalaitoksen eri järjestelmissä	8
3.	YKSISUUNTAVENTTIILIEN AINETTA RIKKOMATTOMAN KUNNONVALVONNAN MENETELMIÄ	10
3.1	Akustisen emission mittaaminen	10
3.2	Akustisen emission käyttöön perustuvia tutkimustuloksia	11
3.3	Ultraäänimittaus	12
3.4	Ultraäänimittaukseen perustuvia tutkimustuloksia	13
3.5	Sähkömagneettisen kentän mittaaminen	14
3.6	Sähkömagneettisen kentän mittaamiseen perustuvia tutkimustuloksia	15
4.	MENETEMIEN VERTAILU JA SOVELTUVUUS	16
4.1	Menetelmien soveltuvuuden arviointi eri venttiilityyppien ja eri vikatyypin havaitsemiseen	16
4.1.1	Läppäventtiilin epätäydellinen tiivistyminen	16
4.1.2	Vierasesine tai materiaali läppäventtiilissä	17
4.1.3	Auki juuttuminen läppäventtiilissä	18
4.1.4	Liikkuvien osien viat läppäventtiilissä	18
4.1.5	Istukkaventtiilin viat	19
4.1.6	Kääntöventtiilin viat	20
4.1.7	Kaksoisventtiilin viat	20
4.2	Menetelmien soveltuvuuden arviointi eräisiin ydinvoimalaitoksen käyttökohteisiin	21
4.2.1	Läppäventtiili kiehutusvesilaitoksen reaktorisydämen hätäjäähdytys tai lisävesijärjestelmässä	21
4.2.2	Läppäventtiili painevesilaitoksen syöttövesijärjestelmässä	21
5.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	23
	LÄHTEET	25

LYHENTEET JA MERKINNÄT

TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
NEA	Nuclear Energy Agency.
AE	Akustinen emissio
UÄ	Ultraääni
ρ	tiheys
η	viskositeetti
c	äänen nopeus väliaineessa
AE_{rms}	akustisen emisson neliöllinen keskiarvo
P	äänenvoimakkuus
Re	Reynoldsin luku

1. JOHDANTO

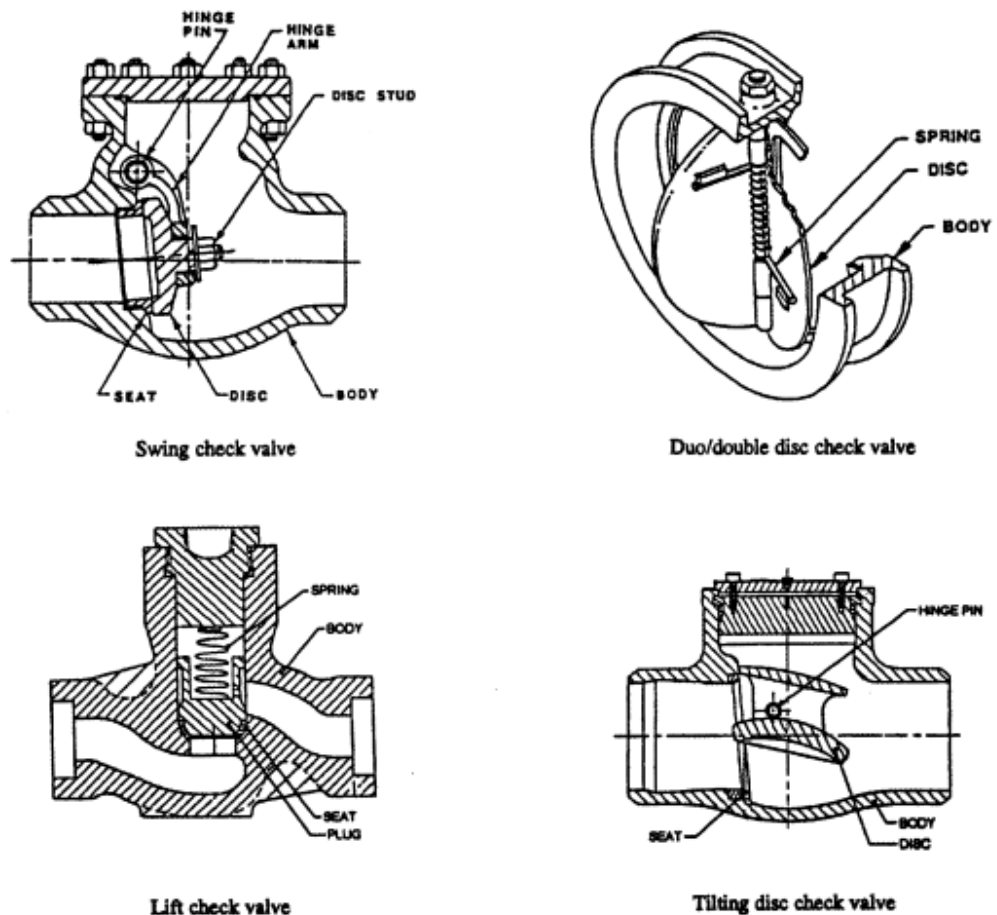
Tässä työssä on tarkasteltu menetelmiä ydinvoimalaitoksen yksisuuntaventtiilien ainetta rikkomattomaan kunnonvalvontaan. Tähän on tarjolla kolme keskeistä menetelmää: Akustinen emissio, Ultraääni, ja sähkömagneettiseen ilmiöön perustuvat menetelmät. Näiden menetelmien käyttöä on tutkittu tähän tarkoitukseen useissa maissa. Kaikista näistä menetelmistä on löydettävissä tutkimustuloksia ja valmiita teollisia tuotteita venttiilien valvontaan. Työn tulokset perustuvat puhtaasti kirjallisuustutkimukseen.

Luvussa 2 esitellään käytössä olevia yksisuuntaventtiilityyppejä ja niiden keskeisiä vikoja. Tähän on käytetty lähteenä venttiilien rakennetta ja tyypillistä käyttöä koskevia tutkimustuloksia ja julkaisuja. Luvun pohjalta arvioidaan myös mitkä venttiilityypit ovat yleisyytensä vuoksi tärkeimpiä tutkimuksen kannalta. Luvussa 3 esitellään kolme menetelmää venttiilien kunnonvalvontaan; Akustinen emissio, Ultraääni sekä Sähkömagneettiset menetelmät. Näiden menetelmien teoreettisia perusteita ja käytettävissä olevia tekniikoita on käsitelty jokaisen menetelmän osalta pohjautuen niitä käsittelevään kirjallisuuteen ja tietoon saatavilla olevista kaupallisista tuotteista. Luvussa 4 on analysoitu eri mittausmenetelmien mahdollisuuksia. Eri menetelmien soveltuvuutta on arvioitu tarkastellen ristiin eri venttiilityyppejä, vikatyypppejä ja kunnonvalvontamenetelmiä. Lisäksi esitetään kaksi tyypillistä ydinvoimalaitoksen järjestelmää ja esitetty esimerkinomainen arvio soveltuvista menetelmistä. Luvussa 5 esitetään tutkimuksen perusteella saatavat johtopäätökset ja yhteenveto mahdollisuuksista.

2. YKSISUUNTAVENTTIILIEN KULUMINEN JA VIKAANTUMINEN

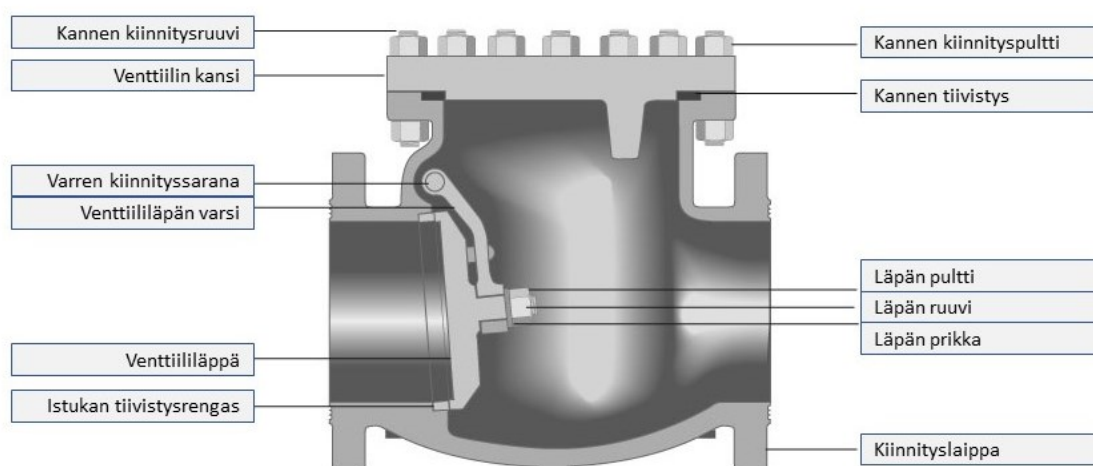
2.1 Yksisuuntaventtiilin rakenne ja eri venttiilityypit.

Yksisuuntaventtiili on venttiilityppi, jonka tehtävänä on sallia yhdensuuntainen virtaus ja samalla estää vastakkainen virtaus. Yksisuuntaventtiilin käyttövoimana voi toimia venttiilin eri puolien paine-ero tai jousivoima. Venttiilejä on useita eri tyyppisiä, mutta niiden toimintamekanismit ovat melko samankaltaisia. Yleensä venttiilissä on venttiililautanen, -läppä tai -mäntä, joka painautuu tiivistyspintoja vasten. Venttiilin sulkeutumisesta voidaan avustaa painovoimalla tai jousivoimalla, mutta varsinainen tiivistyminen tapahtuu, kun paine-ero venttiilin eri puolilla painaa venttiilin sulkupinnan kiinni.



Kuva 1. Yleisimpiä venttiilityyppejä: Läppäventtiili, Kaksoisventtiili, Istukka-venttiili ja Kääntöventtiili (McElhaney et. al 2005)

Läppäventtiilit ovat yleinen yksisuuntaventtiilityyppi ydinvoimateollisuudessa. Ne ovat rakenteeltaan yksinkertaisia, niissä on pieni painehäviö ja ne ovat luotettavasti tiivistyviä. Lisäksi ne ovat helppoja huoltaa ja niillä on hyvä saatavuus. Läppäventtiili aukeaa pienellä paine-erolla. Läppäventtiilissä on yleensä niveltappi ja varsi, jonka avulla venttiilin läppä on ripustettu virtauksen yläpuolelle. Venttiilityypin toiminta perustuu osin painovoimaan, joten venttiilin asennusasennolla on merkitystä sen toiminnan kannalta. Venttiili tiivistyy, kun venttiililäppä painuu istukkaa vasten. Venttiililautasen ripustuksen välykset sallivat venttiililautaselle pienen liikkeen, jotta tiivistyspinnat voivat asettua tiiviisti. Läppäventtiilin heikkoutena voidaan pitää hidasta sulkeutumisaikaa, johtuen läpän suurehkoista massasta.



Kuva 2. Tyypillinen Läppäventtiilin rakenne. (www.cranenuclear.com)

Kaksoisläppäventtiilissä venttiilin keskellä on sarana tai tappi, johon venttiililäpät on jousikuormitteisesti kiinnitetty. Tästä syystä virtaus jakaantuu venttiilissä kahteen kanavaan. Venttiilin saranarakenteen muodostaman epäjatkuvuuden vuoksi tätä venttiilityyppiä ei saada täysin tiiviiksi. Koska virtaus venttiilissä jakautuu kahteen kanavaan ja yleensä läppää painaa jousivoima, on kaksoisläppäventtiilin painehäviö suhteellisen suuri muihin venttiilityyppeihin verrattuna. Koska läppä toimii jousikuormitukseen perustuen, venttiilin toiminta on asennusasennosta riippumaton. Niin ikään jousikuormitteisuuden vuoksi se sulkeutuu lähes välittömästi, kun virtaus sallittuun virtaussuuntaan loppuu. Venttiilin sulkeutumisaika on siis lyhyt.

Istukkaventtiilissä on mäntä, joka on asennettu sen mitoille sovitettuun kanavaan. Jousivoima painaa venttiilin mäntää tiivistyspintoja vasten. Venttiili tiivistyy siis jousivoi-

man avulla. Venttiilin toiminta on näin ollen asennosta riippumaton. Venttiilin etuja on sen yksinkertainen rakenne, joka helpottaa venttiilin huoltoa. Venttiili on muita venttiilityyppejä herkempi jumiutumaan kiinteän aineen aiheuttaman likaantumisen vuoksi. Venttiili on ongelmallinen niissä tilanteissa, joissa virtauksessa esiintyy virtauksen suurta vaihtelua, sillä tällainen värähtely voi kuluttaa mäntää ja ohjauspintoja nopeastikin.

Kääntöventtiilissä saranatappi on sijoitettu virtauksen keskelle. Siihen on ripustettu läppä. Läpän painopiste eroaa saranatapin kohdasta siten, että painovoima kääntää läpän sulkuasentoon. Kääntöventtiili on läppäventtiiliä nopeampi sulkeutumaan, johtuen läpän suhteesta pienemmästä etäisyydestä sulkupintoihin. Venttiilityyppi vaatii hyvin tarkan koneistuksen ja on herkkä kulumille johtuen siitä, että läppä ei laskeudu vaan kääntyy tiivistyspintaa vasten. Myöskin pienetkin saranatapin kulumat aiheuttavat venttiilissä tiivistymisongelmia.

2.2 Yksisuuntaventtiilin ongelmat ja vioittumismekanismit

Yksisuuntaventtiili voi vioittua lukemattomilla tavoilla. Yksisuuntaventtiilin käyttötarcoitus on estää virtaus venttiilin läpi tiettyyn virtaussuuntaan. Näin ollen venttiilin toimintatarkoituksen kannalta voidaan ajatella venttiilin vioittuneen tilanteissa joissa:

- venttiili ei estä virtausta kuten on suunniteltu, vaan se jää ”auki”. Tällaiseksi luetaan myös tilanne, jossa ei sulkeudu riittävän tiiviisti, vaan se vuotaa.
- venttiili ei avaudu kuten on suunniteltu vaan se jumiutuu ”kiinni”

Kirjallisuudessa tunnistetaan useita muunkin laisia venttiilin vikatilanteita. Lee et al. esittelevät vuonna 2003 julkaistussa tutkimuksessa tuloksia perustuen ydinvoimaoperaattorille tehtyyn kyselyyn (Lee et al. 2003). Tutkimuksessa luokitellaan vioittumistapoja seuraavasti:

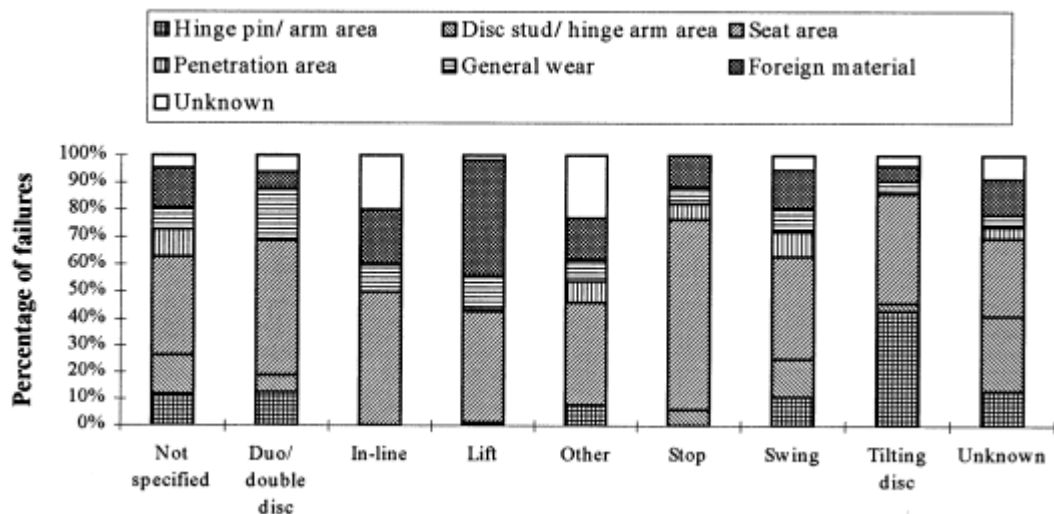
- Venttiililautasen tai istukan kuluminen
- Niveltapin/saranan kuluminen
- Vieraan esineen aiheuttama vaurio
- Väärä asennus
- Likaa/ainetta venttiililäpässä
- Puute suunnittelussa
- Riittämätön kunnossapito.

Leen tutkimus koskee nimenomaan läppä-tyyppisen yksisuuntaventtiilin valvontaa, joten myös vikaluokittelu on tarkoitettu nimenomaan kyseisen venttiilityypin vikojen määrittelemiseen. Tässä kyselyssä merkittävimmäksi vikaluokaksi nousee venttiililautasen tai istukan kuluminen, joka edustaa 25% tapauksista. Niveltapin/saranan kulumisella, vieraan esineen aiheuttamalla vauriolla ja väärällä asennuksella on kaikilla yli 10% osuus tapauksista. (Lee et al 2003)

McElhaneyn vuonna 1999 tehty tutkimus perustuu Yhdysvaltain ydinvoimalaitosten luotettavuustietojärjestelmässä oleviin tietoihin. Siinä tarkasteltiin yli 800 yksisuunta-venttiilin vikatapausta. Tutkimuksen tarkoituksena on nimenomaan ollut kehittää tietoutta venttiilien vioittumisesta, joten venttiilien vikatilastoja on tarkasteltu ja ristiin tarkasteltu varsin laajasti. Tutkimuksessa luokiteltiin esimerkiksi venttiilien vioittumistapoja vioittumisalueen mukaan seuraavasti (McElhaney 1999):

- Venttiilivarren saranointi ja laakerointi: kuluma tai vika venttiilin niveltapissa tai saranoinnissa, joka vaikuttaa venttiilivarren liikkeeseen.
- Venttiilivarsi: kuluma tai vika venttiilin varressa, joka vaikuttaa venttiililautaseen tai venttiililautasen pulttiin. Mukaan lukien ääriasennon rajoittajaan liittyvät viat.
- Venttiilin istukka: venttiilin istukkaan, sen pintaan ja venttiililautasen ohjaimiin liittyvät viat.
- Läpäisy: venttiilin läpäisyyn liittyvät viat. Kuten tiivisteen rikkoutuminen tai venttiilin tukkeutuminen liasta.
- Yleinen kuluminen: viat joissa on kyseessä venttiilin kuluminen kauttaaltaan eikä tarkka kulumisalue ole määriteltävissä.
- Vieras materiaali: vieraan materiaalin aiheuttama tilanne joka johtaa venttiilin toimimattomuuteen, riippumatta alueesta johon vieras materiaali on vaikuttanut.

Tämän luokittelun on tarkoitus olla yleispätevä siten, että se soveltuu kaikkien venttiilityyppien vikojen luokitteluun. Jaottelu on varsin hyödyllinen venttiileiden kunnonvalvonnan tarpeisiin. Yleisimmin kaikki venttiilityypit vioittuivat venttiilin istukan alueelta. Nämä viat tarkoittavat siis usein käytännössä sitä, että venttiili vuotaa. Istukka-venttiilit olivat selvästi muita herkempiä vieraalle materiaalille ja sen aiheuttamille vioille. Istukkaan liittyvien vikojen lisäksi läppätyypin venttiilit vioittuivat usein saranatapin tai varren alueelta, mutta myös vierasesineen johdosta.

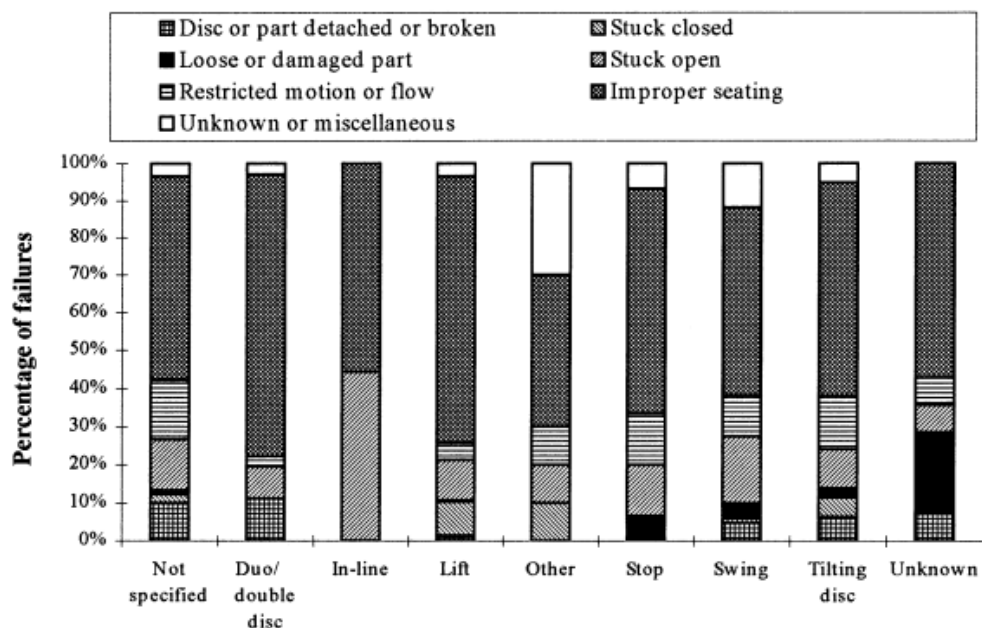


Kuva 3. Venttiilien vioittumisalueen jakautuminen eri venttiilityypeittäin (McElhaney 1999).

McElhaneyn tutkimuksessa on myös käsitelty venttiilivikojen vioittumisoireita ja vian havaitsemista sekä diagnostiikkaa. Vikaantumisen oireiksi luetellaan:

- Venttiili jumiutunut kiinni
- Venttiili jumiutunut auki
- Venttiililautanen tai jokin muu osa rikkoutunut tai irronnut
- Löystynyt tai epätäydellisesti kiinnittynyt osa
- Epätäydellinen tiivistys

Tutkimuksessa käsitellään tilastollisesti eri vikaoireiden esiintymistä eri venttiilityypeillä. Tutkimuksessa todetaan, että kaikilla venttiilityypeillä yhteinen ongelma on epätäydellinen tiivistyminen. Tämä on luonnollista, sillä moni eri mekaaninen vikaantumistapa johtaa tavalla tai toisella venttiilin epätäydelliseen tiivistymiseen. Venttiilin tiivistyspintojen täydellinen kontakti lienee haaste kaikissa venttiilirakenteissa. Istukkatyyppin venttiilin vikaprofiili erottuu muista venttiilityypeistä siten, että sille on muita venttiilejä tyypillisempää jumiutua jompaankumpaan ääriasentoon. Tämä on luonnollista, sillä venttiilin rakenteessa mäntä on sovitettu tiukkaan hahloon, jonka likaantuessa männän liike estyy helposti. Läppätyypin venttiilille on erittäin harvinaista jumiutua kiinni-asentoon. Aineistossa tavattiin vain kaksi tapausta, joissa kummassakin vikaa on edesauttanut prosessitekkinen syy. Kaikilla muilla venttiilityypeillä kiinnijuuttuminen edustaa merkillepantavaa osuutta kaikista vioista.



Kuva 4. Venttiilien vioittumisoireen jakautuminen eri venttiilityypeittäin (McElhaney 1999).

Niin ikään tutkimuksessa on käsitelty vikojen havaitsemista. Vika venttiilissä voi ilmetä käytön aikana, huoltotoimenpiteiden yhteydessä. Tutkimuksessa on luokiteltu havaitsemistapoja seuraavalla luokittelulla

- Venttiilin vaihdon tai tarkastuksen yhteydessä
- Muun kunnossapidon yhteydessä
- Vuoto venttiilin ulkopuolelle
- Ei hydraulinen/pneumaattinen indikaatio (epätavallinen ääni tms.)
- Venttiilin toiminnallinen testaus (vuotokoe tms.)
- Ainetta rikkomaton testaus (ultraääni, akustinen emissio tai sähkömagneettiset menetelmät tai radiografia)
- Hydraulinen/Pneumaattinen indikaatio (operaattorin havaitsema venttiilin toimimattomuus, paine-eron, lämpötilan, ym. mittauksen avulla)
- Pumpun tai kompressorin vastakkaissuuntainen toiminta venttiilivian seurauksena.

NEA:n (Nuclear Energy Agency) asettama tutkimusryhmä tarkasteli vuonna 2003 julkaistussa raportissa yksisuuntaventtiilien aiheuttamia yhteisvikatilanteita. (NEA 2003) Tämän tutkimuksen päätarkoitus on ollut löytää syitä ja luokitella eri komponenttien yhteisvikaantumiseen johtaneita tilanteita. Raportissa on kuitenkin käsitelty yksisuuntaventtiilien vikaantumistilastoja. Raportissa ei ole luokiteltu vikaantumisia eri venttiili-tyyppien kannalta. Raportissa jaetaan vikaantumistavat seuraavalla luokittelulla:

- Vika avautumisessa
- Vika sulkeutumisessa
- Vuoto venttiilin ulkopuolelle
- Vika venttiilin tiiveydessä (sisäinen vuoto)

Tutkimuksessa todetaan, että yleisimmät vioittumistavat aineistossa ovat viat sulkeutumisessa sekä vika venttiilin tiiveydessä. Nämä kaksi luokkaa käsittävät 71 kappaletta kaikista 96 vioittumisesta.

NEA:n raportissa on myöskin luokiteltu vikatapauksia mekaanisten vioittumistapojen perusteella. Tässä on päädytty seuraavaan luokitteluun:

- Venttiilin liike estynyt karstan, lian tai hapettumistuotteiden johdosta
- Venttiilin vuotaminen tiivistyspintojen kulumisen johdosta
- Venttiilin täydellinen sulkeutuminen estynyt läpän/istukan epätäydellisen asemoitumisen vuoksi
- Venttiilin liike estynyt venttiilin osien deformaation vuoksi
- Venttiilin liike estynyt rikkinäisen ruuvien, pulttien, saranan tms. vuoksi.

Tämän luokittelun mukaisessa tarkastelussa merkittävin osa vioittumisista kuuluu kahden ensimmäiseen kategoriaan, eli venttiilin liike on estynyt likaantumisen seurauksena

tai tiivistyspinnat ovat kuluneet. Näin luokitellaan aineistossa kaikkiaan 50 tapausta 88:sta.

Tutkimuksessa on mainittu lisätietona, että tapauksissa joissa venttiiliin liike on estynyt karstan lian tai hapettumistuotteiden johdosta, vika liittyy 75%:sti kemialliseen kulumiseen. Samaan tapaan tapauksista joissa on kyse tiivistyspintojen kulumisesta, mainitaan että niistä 85% liittyy tiivistyspintojen mekaaniseen kulumiseen.

Edellä mainittujen lisäksi kirjallisuudessa nousee esiin yhtenä erikoistapauksena venttiilin värähtely ja sen aiheuttama kuluminen tai vuotaminen sekä näiden seuraukset. Tätä käsitellään mm. Lee:n erästä yksittäistä venttiiliongelmaa koskeneessa tutkimuksessa. Teollisissa käyttötarkoituksissa venttiili joudutaan usein asentamaan ympäristöön, jossa esiintyy mekaanista värähtelyä. Värähtely voi johtaa kulumiseen venttiilin liikkuvien osien jatkuvan liikkeen aiheuttaman mekaanisen kulumisen vuoksi. Niin ikään suuriamplitudinen värähtely voi jo sellaisenaan aiheuttaa venttiilin vuotamista. (Lee et al 2010)

2.3 Yksisuuntaventtiilin vioittumisen aiheuttamat ongelmat

Yksisuuntaventtiilin rikkoutuminen voi aiheuttaa vakaviakin ongelmia riippuen siitä minkälaisessa järjestelmässä ja käyttötarkoituksessa venttiili on. Rikkoutumisen aiheuttamat seuraukset riippuvat siis venttiilin käyttötavasta. Kirjallisuudessa nousee kuitenkin esille esimerkkitaapauksina järjestelmien ylipaineistuminen ja sen aiheuttama komponenttien vaurioituminen, sekä vesi-iskut. Rikkoutunut venttiili voi myös aiheuttaa järjestelmän laitteen tai koneen vastakkaissuuntaisen toiminnan, esimerkiksi pumpun tai kompressorin vastakkaissuuntaisen pyörimisen (McElhaney 1999).

2.4 Yksisuuntaventtiilien käyttö ja vioittuminen ydinvoimalaitoksen eri järjestelmissä

McElhaneyn tutkimuksen mukaan läppäventtiili on yleisin venttiilityyppi tutkimuksen ydinvoimalaitoksilla. Läppäventtiilien osuus on 28% kaikista tutkituista venttiileistä. Myös istukkaventtiileillä on merkittävä osuus (19%).

McElhaney käsittelee tutkimuksessaan myös venttiilien vioittumistaajuuksia ydinvoimalaitoksen eri järjestelmäkohteissa. Tutkimusraportin mukaan istukkaventtiileillä on korkea vikataajuus niiden sijaitessa komponenttijäähdytysjärjestelmässä ja hätä/lisäveden jakelujärjestelmässä. Kääntöventtiileillä on suhteellisen korkea vikataajuus niiden sijaitessa korkeapainehätäjäähdytysjärjestelmässä ja reaktorisydämen eristysjäähdytysjärjestelmässä. Läppäventtiileillä korkein vikataajuus esiintyi suojarakennuksen eristysjärjestelmässä, päähöyryjärjestelmässä ja lauhdutusaltaan tukijärjestelmissä. (McElhaney 1999)

NEA:n raportti ei erittelee vikojen jakaantumista eri järjestelmiin. Se kuitenkin toteaa vikojen esiintyneen mm. reaktorisydämen eristysjärjestelmässä, apu/hätävesijärjestelmässä, jälkilämmön poistojärjestelmässä, sydämen hätäjähdytysjärjestelmässä, jakeluvesijärjestelmässä ja komponenttijähdytysjärjestelmässä. (NEA 2003)

3. YKSISUUNTAVENTTIILIIEN AINETTA RIKKOMATTOMAN KUNNONVALVONNAN MENETELMIÄ

3.1 Akustisen emission mittaaminen

Akustinen emissio (AE) on materiaalissa tapahtuvaa materiaalin rakenneosien elastista liikettä. Akustinen emissio määritellään taajuusalueella 1 kHz- 1 MHz tapahtuvaksi. Akustinen emissio voidaan jakaa luonteeltaan yksittäiseksi akustiseksi emissioksi tai jatkuvaksi akustiseksi emissioksi. Yksittäinen akustinen emissio syntyy yksittäisessä tapahtumassa joka vapauttaa materiaalin sisäistä energiaa. Jatkuva akustinen emissio on jonkin jatkuvan ulkopuolisen energianlähteen emissiota. Molemmissa tapauksissa liike-energia etenee materiaalissa sen sisäisenä jännitysaaltona. Näitä jännitysaaltoja voidaan havainnoida.

Yksittäisen akustisen emission mittausta voidaan soveltaa materiaalissa esiintyvien vaurioiden ja materiaalivirheiden havaitsemiseen. Tämä tapahtuu mittaamalla akustisia emissioaaltoja, jotka syntyvät materiaalissa kun esimerkiksi paineastiassa oleva särö kasvaa ja vapautta energiaa.

Jatkuvan akustisen emission mittausta voidaan soveltaa esimerkiksi vuotojen havaitsemiseen. Tämä tapahtuu mittaamalla akustisia emissioaaltoja jotka syntyvät vuotavan aineen liikkeestä vuotokohdan pintoja vasten.

Akustista emissiota voidaan tarkastella mittaamalla kappaleessa eteneviä jännitysaaltoja kappaleen pinnalta. Yleisimmin tämä tapahtuu käyttämällä pietsosähköisiä antureita. Antureiden toiminta perustuu pietsosähköiseen ilmiöön, jossa mekaaninen jännitys synnyttää sähköisen jännitteen. Akustisen emission anturit voidaan luokitella resonanssi- ja laajakaistatyypin antureihin. Näissä laajakaistatyypin antureissa on anturin sisäinen vaimennus. Tällä vaimennuksella voidaan ehkäistä jännitysaallon heijastuksia anturissa ja rajoittaa anturin herkkyyttä.

Akustisen emission käyttäminen edellyttää käytännössä kaikissa sovellutuksissa signaalin käsittelyä. Signaalin käsittelyjärjestelmä käsittää vahvistimen ja laitteen johon tulokset tallennetaan. Tulosten tulkinta edellyttää tähän soveltuvaa tietokoneohjelmaa tai tähän tarkoitukseen tehtyä tehdasvalmisteista signaalianalysaattoria.

Akustisen emission mittauksessa olennainen mitattava suure vaihtelee sovellutuksen mukaan. Esimerkiksi mitatessa yksittäisiä jännitysaaltoja, saattaa olla käytännöllistä ha-

vainnoida yksinkertaisesti saapuneiden jännitysaaltojen määrää tai niiden energiaa. Jatkuvan akustisen emission kyseessä tulee yleensä olennaiseksi saada tietää taajuusspektri.

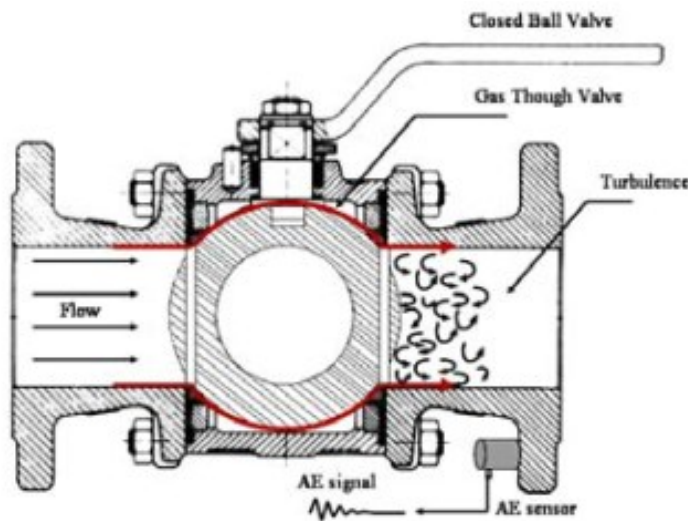
3.2 Akustisen emission käyttöön perustuvia tutkimustuloksia

Useissa tutkimuksissa on esitetty mahdollisuus havaita venttiilin vuotaminen vuodon aiheuttaman akustisen emission perusteella. Vuotoa on mahdollista havaita, oli väliaineena neste tai kaasu. Esimerkiksi Kaewwaewnoui et. al ovat tutkineet tätä ilmiötä (Kaewwaewnoui et. al 2009)

Kaewwaewnoui:n mukaan akustinen emissio muodostuu vuotavassa venttiilissä virtavan aineen nopeuden kiihtyessä. Turbulenssin aste on ennakoitavissa Reynoldsin luvun avulla:

$$Re = \frac{\rho r v}{\eta}$$

Jossa ρ on tiheys [kg/m^3], v on virtauksen nopeus [m/s], r on virtausaukon säde [m], ja η on viskositeetti [Pas]. On todettua, että Reynoldsin luvun ollessa välillä 1 000 – 10 000 se tuottaa akustisen emission.



Kuva 4. Kuvaus turbulenssin ja Akustisen emission muodostumisesta palloventtiilissä, sekä ehdotus AE-sensorin sijoittamisesta. Venttiilityyppi ei eole yksisuuntaventtiili, mutta ilmiön teoria pätee myös yksisuuntaventtiilille (Kaewwaewnoui et al. 2009)

Kaewwaewnoui:n mukaan turbulenssin virtauksen äänenvoimakkuus voidaan laskea Lighthill:n yhtälöllä:

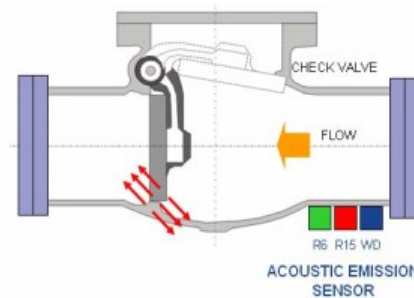
$$P_s = \frac{\rho v^8 D^2}{c^5}$$

Jossa P_s on äänenvoimakkuus [W], ρ on tiheys [kg/m^3], D on venttiilin halkaisija [m] ja c on äänennopeus väliaineessa [m/s]. Kaewwaewnoin mukaan kirjallisuuden mukaan voidaan todeta, että äänenvoimakkuudella P_s on riippuvuus keskimääräisestä akustisen emission signaalin voimakkuuden neliöllisestä keskiarvosta AE_{rms} . Tämä yhteys voidaan kirjoittaa palloventtiilin tapauksessa

$$AE_{rms} = C_0 \frac{P_1^4 d^{16}}{c^5 \rho^3 D^{14}}$$

Jossa P_1 on tulopuolen paine [kg/ms^2], d on reiän halkaisija [m], ja C_0 on vakio, c on äänennopeus väliaineessa [m/s] ja ρ on tiheys [kg/m^3]. Yhtälö ei siis päde millekään yksisuuntaventtiilityypille, mutta se käy esimerkiksi siitä, että vuodon ja akustisen emission välille voidaan esittää yhteys matemaattisessa muodossa.

Korean atomienergiainstituutissa tehdyissä kokeissa tutkittiin vuonna 2005 julkaistussa raportissa vuodon havaitsemista nimenomaan yksisuuntaventtiiliin asennetuilla AE sensoreilla. Kokeissa yksisuuntaventtiiliin asennettiin kulumisasteeltaan erilaisia venttiililautasia, niveltappeja sekä hitsattiin pieniä pistehitsejä kuvaamaan vierasta materiaalia venttiilissä. Näissä kokeissa havaittiin selvästi korrelaatio vuodon ja tiettyjen AE taajuuksien välille. Korrelaatio oli havaittavissa sekä venttiilikulumaa että vierasesinettä kuvaavassa kokeessa. (Lee et al 2005)



Kuva5: Lee:n käyttämä akustisen emission mittausjärjestely (Lee et. al. 2005)

3.3 Ultraäänimittaus

Ultraääni on aineen partikkelien aaltoliikettä. Ultraääni määritellään taajuualueella > 20 kHz tapahtuvaksi. Ultraäänialto etenee aineessa äänen kaltaisesti.

Ultraäänimittauksessa mitattavaan aineeseen lähetetään ultraäänipulsseja. Tällöin osa lähetetyistä pulsseista heijastuu takaisin. Lähetetyn ja vastaanotetun pulssin välisestä

ajasta voidaan päätellä heijastuskohdan etäisyys, kun väliaineen ominaisuudet tunnetaan.

Signaalin takaisinheijastumisetäisyys voidaan laskea yksinkertaisesti tunnettaessa äänen nopeus materiaalissa sekä aika, joka kului signaalin lähettämisestä vastaanottamiseen.

$$d = \frac{c t}{2}$$

Jossa d on signaalin kulkema matka [m], t on aika [s] ja c on äänen nopeus väliaineessa [m/s] (JSNDI 2016).

Ultraääniä tuotetaan ja havaitaan tyypillisesti pietsosähköisiä antureita käyttämällä. Ultraääntä voidaan tuottaa myös pyörrevirta-antureilla, joilla synnytetään ultraäänitaajuinen magneettikenttä, jolla ultraääni tuotetaan. Molemmissa tekniikoissa samaa anturia voidaan useimmiten käyttää niin lähettimenä kuin vastaanottimena.

Ultraäänen tuottaminen ja vastaanotetun signaalin käsittely vaativat tähän tarkoitukseen sopivan laitteiston. Signaalin tuottaminen vaatii pulssigeneraattorin ja vastaanottimen, joiden avulla signaali tallennetaan, tai jolla se analysoidaan välittömästi.

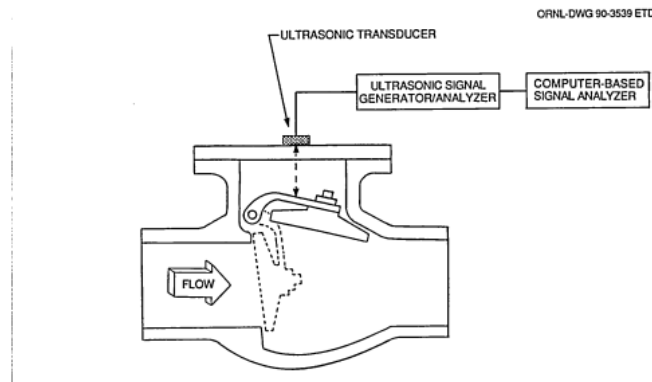
3.4 Ultraäänimittaukseen perustuvia tutkimustuloksia

Lee et al. käyttivät ultraäänimittausta yhtenä osana mittausjärjestelyä, jossa käytettiin myös kiihtyvyyssantureita ja akustisen emission antureita. Tässä kokeessa ultraäänianturi oli suunnattu kohtisuoraan venttiilin kammiota. Yksinkertaisesti mittaamalla ultraäänen avulla etäisyyttä heijastumiskohtaan voitiin päätellä venttiililautasen asento. (Lee et al. 2005)

Haynes näkee mahdollisuudet ultraäänen hyödyntämiseen varsin yksityiskohtaisina. Haynes:n mukaan ultraäänellä voidaan tunnistaa seuraavat venttiilin käyttötilat

- Kokonaan kiinni tai kokonaan auki (tasainen signaali)
- Vapaa värähtely (aaltomuotoinen jaksollinen signaali)
- Värähtely ääriasennon rajoittajaa vasten (jaksollinen signaali jossa ”litistynyt” aalto)
- Värähtely istukkaa vasten (jaksollinen signaali jossa ”litistynyt” aalto)

Haynes tunnistaa ultraäänen mahdollisuuksiksi lisäksi havaita kokonaan irronnut venttiililautanen, venttiililautasen jumituminen sekä venttiililautasen pultin löystyminen. (Haynes 2009).



Kuva 6: Havainnekuva ultraääneen perustuvasta mittausjärjestelystä. Kaupallinen tuote nimeltä *CHECKMATE II* (Haynes 1990)

3.5 Sähkömagneettisen kentän mittaaminen

Sähkömagneettista kenttää ja sen muutoksia voidaan havainnoida sekä tehdä sen avulla erilaisia havaintoja. Sähkömagneettista kenttää voidaan hyödyntää esimerkiksi pyörrevirtamittauksessa ja Ns. Hall-anturiin perustuvissa sovelluksissa.

Pyörrevirtamittausta voidaan käyttää esimerkiksi seuraavan kaltaisen sovelluksen avulla. Pyörrevirtamittausta varten tuotetaan yhden kelan avulla magneettikenttä venttiilirungon läheisyyteen. Toisen kelan avulla havainnoidaan tämän magneettikentän muutoksia. Kun venttiililautanen liikkuu, osien liike muuttaa magneettikentän muotoa. Magneettikentän muutos indusoi jännitteen toiseen kelaan ja tästä voidaan päätellä venttiilin liikkuvan. Koska pyörrevirta on hyvin epälineaarista, voidaan tästä tehdä vain kvalitatiivista analyysiä. Venttiilin tarkkaa asentoa ei voida päätellä vaan ainoastaan päätellä sen liikkuvan. Pyörrevirtamittaus on myös riippuvainen käytetyistä materiaaleista ja niiden ferromagneettisista ominaisuuksista (Haynes 1990).

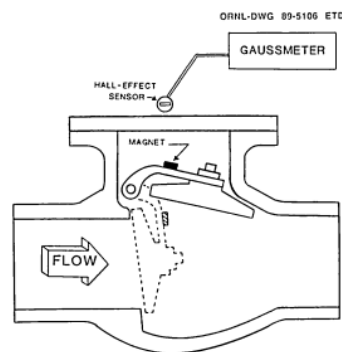
Hall-ilmiössä elektronien kulkusuunta muuttuu kun johdin, jossa kulkee sähkövirta, tuodaan magneettikenttään kohtisuorassa magneettikenttään nähden. Hall-anturi on käytännössä esimerkiksi metalliliuska. Kun liuska on magneettikenttää vasten kohtisuorassa ja siihen kytketään sähkövirta, magneettikenttä vaikuttaa liuskassa kulkeviin elektroneihin poikkeuttaen ne liuskan toiseen reunaan. Tällöin liuskan eri reunojen välille syntyy jännite, joka voidaan mitata.

Hall-anturin etu verrattuna induktioon perustuviin mittausjärjestelyihin on se, että se ei edellytä magneettikentän liikettä. Näin Hall-anturilla voidaan esimerkiksi päätellä venttiililautasen asento. Koska Hall-anturinkin tapauksessa mitataan vain magneettikentän ilmiötä, menetelmän tarkkuus on varsin rajallinen. Sillä voidaan mitata esimerkiksi

venttiilin tila; auki tai kiinni. Mutta esimerkiksi venttiililautasen avautumiskulman tai tarkan asennon mittaamiseen tarkkuus ei kuitenkaan riitä.

3.6 Sähkömagneettisen kentän mittaamiseen perustuvia tutkimustuloksia

Haynes esittää tutkimuksessaan Hall-anturiin perustuvia mittausjärjestelyjä. Näissä viitataan Oak Ridge National laboratoryssä tehtyisiin kokeisiin. Mittausjärjestelyssä Hall-anturi oli kiinnitetty venttiilin kanteen ja venttiilivarteen oli kiinnitetty havainnoitava magneettielementti. Kokeissa mitattiin manuaalisesti venttiililautasen asentoa ja verrattiin tätä Hall-anturilla saatuun signaaliin. Tulokset olivat yhteneväiset. Haynesin mukaan tällä järjestelyllä voidaan varsin selkeästi havaita myös niveltapin kuluminen, koska venttiilivarren liikkeessä on havaittavissa selvä muutos niveltapin kuluessa ja järjestelyssä magneettielementti on kiinnitetty nimenomaan venttiilivarteen (Haynes 1990).



Kuva 7: Havainnekuva Haynes:n Hall-anturiin perustuvasta mittausjärjestelystä (Haynes 1990)

Haynesin esittämässä menetelmässä käytetään kestmagneettia, joka on asennettu venttiilin sisään. Tässä tullaan puuttuneeksi venttiilin sisäiseen rakenteeseen. Toinen vaihtoehto on asettaa sähkömagneetti venttiilin ulkopuolelle, jolloin pyritään magnetoimaan tarkasteltava venttiilin osa, kuten venttiililautanen. Tätä tekniikkaa käytetään esimerkiksi Areva-yhtiön Ultracheck tuotteessa (Areva 2013)

4. MENETEMIEN VERTAILU JA SOVELTUVUUS

4.1 Menetelmien soveltuvuuden arviointi eri venttiilityyppien ja eri vikatyypin havaitsemiseen

Eri venttiilityypeillä on useita eri tapoja vikaantua. Eri venttiilityypeistä ja eri vikatyypeistä muodostuu suuri määrä kombinaatiota. Eri menetelmien soveltuvuuden vertailuun on järkevää valita keskeisimpiä tapauksia.

Päähuomio kiinnitetään läppäventtiilin ongelmiin, koska se on venttiilityypeistä yleisin, ja myös tutkimukset eri kunnonvalvontamenetelmistä keskittyvät läppäventtiileihin. Menetelmien soveltuvuutta arvioidaan myös muiden venttiilityyppien vikoihin, mutta tässä tyydytään yleisen tason tarkasteluun jakamatta tarkastelua eri vikatyyppeihin.

Epätäydellinen tiivistyminen todetaan niin McElhaneyn, Leen kuin NEA:n raporteissa kaikkein tyypillisimmäksi vikatapaukseksi käytännössä kaikilla venttiilityypeillä. Koska venttiilin täydellinen tiivistyminen on useissa käyttökohteissa, kuten käytettäessä venttiiliä eri tilojen tai järjestelmien erottamiseen, se on varsin keskeinen vikatapaus otettavaksi tarkasteluun.

Vieraan esineen tai materiaalin aiheuttaman vian merkitys nousee esille kaikissa tarkastelluissa tutkimuksissa. Tätä voidaan pitää siinä mielessä yllättävänä, että prosessiveden puhtaus on merkityksellinen asia ydinvoimateollisuuden sovelluksissa. Erilaisten laiterikkojen ja huoltotoimenpiteiden vuoksi vierasesineitä ja materiaalia kuitenkin päätyy järjestelmään.

Venttiilin auki juuttuminen on lähes kaikissa tarkastelluissa tutkimuksissa nostettu esille omana vikakategorianaan. Luonnollisesti tämä on yksisuuntaventtiilin yksi keskeinen tapaus.

Erityisesti läppäventtiileillä nousee esille venttiilin saranaan, niveltappiin, varteen, venttiililäpän pulttiin liittyvät viat. Näistä voidaan käyttää esimerkiksi nimitystä ”venttiilin liikkuvien osien viat”. McElhaneyn mukaan yli 40 % läppäventtiilin vioista voidaan käsittää näillä venttiilin alueilla tapahtuviksi vioiksi.

4.1.1 Läppäventtiilin epätäydellinen tiivistyminen

Epätäydellisellä tiivistymisellä tarkoitetaan tässä yhteydessä tilannetta, jossa venttiililautanen liikkuu ääriasentojen välillä, mutta venttiili ei saavuta täyttä tiiveyttä vaan vuo-

taa. Tähän voi olla monta syytä. Venttiililautanen tai istukka voi olla kulunut, pintojen välissä voi olla likaa, hapettumistuotteita tai vierasta materiaalia. Myös venttiililäpän liikkeen rajoittuminen tai venttiililäpän epätäydellinen kohdistuminen istukkaa vasten voi aiheuttaa epätäydellisen tiivistymisen, jonka seurauksena venttiili vuotaa.

Akustisen emission mittauksella voidaan tunnistaa venttiilin vuoto sen lähettämän akustisen emission avulla. Tässä on siis kysymys vian seurauksen, eli vuodon havaitsemisesta. Tällä mittauksella ei voida ennakoida alkavaa vikaa, mutta saatu mittaustulos korreloi vuodon suuruuden kanssa. Näin ollen alati kasvava vuoto voi olla mahdollista havaita akustisen emission avulla ja korjata ennen kuin se aiheuttaa suuren ongelman.

Ultraäänimittauksella ei voida havainnoida varsinaisesti venttiilin vuotamista. Itse vuotoa ei voida ultraääneen perustuen havaita. Vuotoon riittävät millimetrin tai alle kokoiset virheet venttiilin pinnalla, joten voidaan todeta, että ultraäänen avulla ei saada niin tarkkaa kuvaa venttiililautasen asennosta, että siitä voitaisiin päätellä epätäydellinen tiivistyminen. Karkea kuva venttiililautasen asennosta kuitenkin saadaan, ja sitä voidaan luonnollisesti hyödyntää esimerkiksi yhdessä akustisen emission mittaamisen kanssa tilanteen päättelyssä.

Sähkömagneettisilla menetelmillä ei niin ikään voida havainnoida suoraan venttiilin vuotamista. Samoin kuin ultraäänen osalta, näiden menetelmien tarkkuus venttiililautasen asennon tarkkailussa ei ole riittävä siihen, että venttiililautasen asennosta voitaisiin päätellä epätäydellinen tiivistyminen.

4.1.2 Vierasesine tai materiaali läppäventtiilissä

Vierasesineen tai materiaalin aiheuttama vika on syytä katsoa eri vikatyypiksi epätäydelliseen tiivistymiseen nähden kahdestakin syystä. Mittasuhteiltaan suuren kappaleen, kuten järjestelmään huoltotöissä päätyneen esineen tai pumpusta irronneen tiivisteiden aiheuttama vuoto venttiilissä on eri suuruusluokkaa kuin venttiilin epätäydellisen tiivistymisen tapauksessa. Toisekseen oikeansuuntaisten huolto ja korjaustoimenpiteiden kannalta on erittäin tärkeää tietää, aiheutuuko venttiilin vuoto venttiilin kulumisesta vai vieraasta esineestä tai materiaalista. Jossain tapauksissa tämä tieto olla myös turvallisuuden kannalta merkityksellistä.

Akustista emissiota mittaamalla saadaan epätäydellisen tiivistymisen tapaan tieto venttiilin vuotamisesta. Kuitenkin suuren vierasesineen tai suuren määrän vierasta materiaalia sisältävässä tapauksessa tieto voi suuren vuotomäärän vuoksi olla irrelevanttia koska vuoto aiheuttaa prosessiteknisesti esiin tulevia ongelmia. Niin ikään, jos vierasesine on suuri ja virtaus pieni, ei välttämättä synny sellaista turbulenssia kuin pienen vuodon tapauksessa. Havaittavissa olevaa akustista emissiota todennäköisesti kuitenkin syntyy, mutta havainnointilaitteiston on oltava viritetty tälle sopivaksi.

Ultraäänimittauksella voidaan havaita venttiililäpän normaalista sulkuasennosta poikkeava asento vierasesineen tapauksessa. Suuren vierasesineen tapauksessa ultraäänimittauksella voi olla myös mahdollista havaita itse vierasesine, jos se on riittävän suuri. Tämä kuitenkin edellyttää venttiilin normaalien käyttötilanteiden muodostamien spektrien hyvää tuntemusta.

Sähkömagneettiset menetelmät sopivat vierasesineen tunnistamiseen venttiililäpän asento-poikkeaman kautta. Samoin kuin ultraäänimittauksessa, venttiililäpän asennon täytyy olla kuitenkin huomattavasti normaalista poikkeava. Epävarmuutta aiheuttaa kuitenkin se, miten mahdollinen ferromagneettinen aine vaikuttaa magneettikenttään. On mahdollista, että mittaus häiriintyy vieraasta aineesta tai esineestä niin, että mittaustulos jää vähintäänkin epävarmaksi.

4.1.3 Auki juuttuminen läppäventtiilissä

Auki juuttuminen eroaa vikatyypinä vierasesineen ja epätäydellisen tiivistymisen tapauksista siten, että siinä venttiili jumiutuu liikkuvien osien vian vuoksi. Käytännössä näissä tapauksissa venttiilin sarana on jumiutunut tai venttiilin on kiinnittynyt esimerkiksi ääriasennon rajoittajaan.

Akustisen emission mittauksesta ei ole tässä vikatapauksessa konkreettista hyötyä, koska vuoto venttiilin läpi on suuri. Turbulenssin muodostuminen on epävarmaa ja vuoto on prosessiteknisesti selvästi havaittavissa.

Ultraäänimittaus kertoo tässä tapauksessa varsin varmasti venttiililautasen jumiutumisen, kun tunnetaan ultraäänen ääriasennossa muodostama spektri. Ultraäänimittauksella voi olla tässä vikatapauksessa mahdollisuus ennakoivaan vian havaitsemiseen tietyssä erikoistapauksessa. Jos venttiilin käyttösovellus on sellainen, jossa venttiili on usein tai esimerkiksi normaalikäytön aikana jatkuvasti auki ja virtauksen aiheuttama voima ei paina venttiililautasta jatkuvasti asennonrajoittajaan, (lautanen värähtelee normaalikäytössä) voidaan asennonrajoittajaa kohti painuminen tunnistaa ultraäänimittauksen avulla. Tästä ei voida tehdä johtopäätöstä, että venttiili on jumiutunut, mutta voidaan havaita muutos venttiilin käyttäytymisessä.

Sähkömagneettisilla menetelmillä saadaan auki juuttumisen osalta likimain samankaltainen tieto kuin ultraäänen avulla. Venttiililautasen liikkeen tai liikkumattomuuden tunnistamiseen pyörrevirtamittaus soveltunee Hall-anturia paremmin.

4.1.4 Liikkuvien osien viat läppäventtiilissä

Läppäventtiilin liikkuvien osien viat voivat aiheuttaa erilaisia ongelmia. Tyypillisin muodostuva ongelma on niveltapin kuluminen, joka voi aiheuttaa venttiilin tiivistymisongelmia, koska tällöin venttiilivarsi ei ohjaa venttiililautasta täydellisesti istukkaan.

Saman tyyppisiä ongelmia aiheuttaa myös venttiilivarren vääntyminen tai venttiililautasen kiinnityspultin löystyminen. Venttiilin liikkuvat osat voivat myös likaantua, tai jostakin muusta syystä niiden liike voi olla toivottua hitaampaa tai rajoittua ääriasentojen välille. Eräs liikekoneistoon liittyvä tapaus on myös avoimen venttiiliin venttiililautasen värähtely (usein kutsuttu ”disc-flutter” ilmiöksi). Tämä värähtely voi aiheuttaa niveltapin ennen aikaista kulumista.

Akustisen emission mittauksella ei ole mahdollisuutta saada suoraan tietoa liikkuvien osien vioista. Venttiilin liikkuvien osien kulumisen aiheuttama epätäydellinen tiivistyminen luonnollisesti havaitaan akustisella emissiolla, mutta siitä ei voida suoraan tehdä johtopäätöksiä siitä, mikä on vuodon taustalla.

Ultraäänimittauksella voidaan saada merkittävää tietoa liikkuvien osien vioista. Ultraäänien avulla voidaan seurata venttiililäpän liikettä ja tarkkailla esimerkiksi aukeamis- ja sulkeutumisaikoja. Venttiilin toimintanopeuden hidastuminen kertoo usein venttiilin likaantumisesta tai vieraasta materiaalista venttiilissä. Voidaan teoriassa ajatella, että ultraäänellä voitaisiin havaita kuluneen niveltapin aiheuttama venttiililäpän liikeradan muutos. Tämä kuitenkin edellyttää varsin tarkkaa signaalin analysointia ja sensoreiden asettelun optimoimista tätä tarkoitusta varten. Tärkeä erityistapaus on venttiililäpän mahdollinen rikkoutuminen tai irtoaminen varresta. Tämä tapaus on ultraäänimittauksella hyvin havaittavissa. Kuitenkin tilanteen tulkinta voi olla epäselvyytensä vuoksi jossain määrin haastavaa. Venttiilin liikkuvien osien jaksollisen liikkeen havaitsemiseen ultraäänimittaus soveltuu hyvin. Tällöin havainnoidaan yksinkertaisesti venttiililautasen liikettä.

Sähkömagneettiset menetelmät tarjoavat hyvän keinon venttiilin osien jaksollisen liikkeen tarkasteluun. Hall-anturi soveltuu tähän hyvin, koska se antaa venttiilin asennosta hyvin selkeän kuvan. Tämän mittaustuloksen tulkinta on yksinkertaisempaa kuin ultraäänimittauksen. Liikkeen mittauksessa mittauksen absoluuttinen tarkkuus ei ole tärkeää, vaan merkitystä on enemmänkin liikkeen jatkuvuuden havaitsemisella. Myös venttiilin liikuntanopeudesta voidaan saada ultraäänimittausta vastaavat tiedot sähkömagneettisilla menetelmillä.

4.1.5 Istukkaventtiilin viat

Istukkaventtiilin keskeinen ongelma on sen jumiutuminen karan tiukan sovituksen vuoksi. Tähän voi vaikuttaa vieras esine tai materiaali. Kaikkien venttiilityyppien tavoin epätäydellinen tiivistyminen on myös istukkaventtiilillä yleisin ongelma.

Akustisella emissiolla voidaan havaita venttiilin vuotaminen läppäventtiilin tavoin. Sensorin sijoittaminen parhaan havainnoinnin saavuttamiseksi ei tosin ole aivan niin suoraviivaista kuin läppäventtiilin tapauksessa.

Ultraäänimittauksella voidaan saada istukkaventtiilin tapauksessa vielä läppäventtiiliä hedelmällisempää tietoa. Koska istukkaventtiilissä karan liike on suoraviivainen, ultraäänen tuottama tieto karan asennosta on huomattavasti helpommin tulkittavissa. Venttiilin pesän rakenne on tiiviimpi kuin läppäventtiilissä, joten tämä rajoittaa vieraan esineen havaitsemista.

Sähkömagneettisilla menetelmillä voidaan saada istukkaventtiiliin tapauksessa tietoa karan liikkeestä ja liikenopeudesta. Venttiilikaran suoraviivainen liike helpottaa myös sähkömagneettisen mittausjärjestelyn tulosten tulkintaa.

4.1.6 Kääntöventtiilin viat

Kääntöventtiilin keskeisiä ongelmia epätäydellisen tiivistymisen lisäksi ovat sen rajoittunut liike tai jumiutuminen auki-asentoon.

Voidaan olettaa, että vuodon mittaaminen akustiseen emissioon perustuen toimii yhtä lailla myös kääntöventtiilin tapauksessa. Koska kääntöventtiilissä vuotoa muodostuu venttiililautasen ylä- ja alapuolelle, on huomioitava sen vaikutus sensoreiden sijoittelussa. Voi olla tarpeen myös käyttää kahta sensoria molempien puolien vuodon varmaan havaitsemiseen.

Ultraäänellä voidaan havaita myös kääntöventtiilin liike. Liike on kääntyvä kuten läppäventtiilissä, joten tämä vaikuttaa signaalin tulkintaan. Venttiilityypin yleinen ongelma: venttiililäpän rajoittunut liike on ultraäänellä havaittavissa. Venttiilin pesän rakenne on melko avoin, joten vieraan esineen havaitsemiseen on paremmat mahdollisuudet kuin esimerkiksi istukkaventtiilissä.

Sähkömagneettisilla menetelmillä saadaan myös kääntöventtiilin tapauksessa suurin piirtein samat tiedot kuin ultraäänen avulla koskien venttiililautasen asentoa. On kuitenkin huomioitava se, että venttiililautasen nivelpultin ympärillä kääntyvä liike voi asettaa haasteita sensorien sijoittelulle.

4.1.7 Kaksoisventtiilin viat

Kaksoisventtiilin keskeisiä ongelmia epätäydellisen tiivistymisen lisäksi ovat läpän ja nivelpultin vioittumiset.

Kuten kääntöventtiilillä, myös kaksoisventtiilillä vuoto muodostuu kahteen kohtaan venttiilin tiivistyspintoja. Näin ollen voi olla tarpeen käyttää kahta akustisen emission anturia vuodon havaitsemiseen.

Kaksoisventtiilin tapauksessa ultraäänisensorin sijoittaminen voi olla muita tyyppejä hankalampaa. Koska venttiililäppä on ohut, se ei välttämättä kaikista suunnista aiheuta riittävän selkeää heijastetta.

Sähkömagneettisten menetelmien hyödyntäminen kaksoisventtiilin tapauksessa voi olla hyvin rajallista. Ohueen läppään ei ole välttämättä mahdollista kiinnittää kestomagneettia, ilman että se vaikuttaa venttiilin toimintaan. Niin ikään sen magnetisoituminen sähkömagneetin avulla ole myöskään varmaa.

4.2 Menetelmien soveltuvuuden arviointi eräisiin ydinvoimalaitoksen käyttökohteisiin

Eri mittausmenetelmien käytöstä saatavien hyötyjen käsittelemiseksi tarkastellaan kahta ydinvoimalaitoksen yksisuuntaventtiilin käyttötapausta ydinvoimalaitosympäristössä. Esimerkit eivät koske minkään laitoksen tai reaktorityypin todellista järjestelmää, vaan esimerkit ovat yleisellä tasolla olevia ydinvoimalaitoksen järjestelmiä, jotka useista laitoksista kuitenkin käytännössä löytyvät.

4.2.1 Läppäventtiili kiehutusvesilaitoksen reaktorisydämen hätäjähdytys tai lisävesijärjestelmässä

Reaktorin lisä- ja hätäjähdytysjärjestelmien avulla syötetään vettä reaktoriin onnettomuustilanteessa riittävän jäähdytyksen turvaamiseksi, tai jäähdytetään suoraan reaktorisydäntä. Tämän tyyppisessä järjestelmässä saatetaan käyttää yksisuuntaventtiiliä erottamaan järjestelmän suojarakennuksen ulkopuolinen osa, joka käsittää mm. pumpun ja vesisäiliön. Venttiilin tulee tässä tapauksessa tarjota luotettava eristys reaktorin ollessa paineistettu lähes 100 bar paineella. Eristyksen luotettavuus on tärkeää, koska reaktorisydämen vedessä on jossain määrin radioaktiivisuutta. Häätätilanteessa venttiilin tulee aueta luotettavasti, jotta reaktorin suojauksen kannalta tärkeä jäähdytys voidaan suorittaa. Venttiili on pääosan sen vuotuisesta käyttöajasta kiinni. Venttiiliä voidaan käyttää testauksen vuoksi määräaikauskokeiden yhteydessä. (Pershagen 1989)

Tässä tapauksessa on siis olennaista venttiilin tiiveyden tarkkailu. Tämä voidaan suorittaa akustisen emission avulla. Jos määräaikauskokeiden aikana halutaan varmistaa venttiilin riittävä liike ja nopea avautumisaika, voidaan käyttää Hall-anturiin perustuvaa mitausta venttiiliin avautumisen tarkkailuun. Jos pidetään merkittävänä riskinä, että reaktorin puolelta kertyy venttiilin rakenteeseen vierasta materiaalia tai sakkaa, voitaisiin käyttää ultraäänimittausta. Stabiilisti kiinni olevan venttiilin ultraäänispektrin merkittävä muutos ajan kuluessa antaa viitteitä siitä, että venttiilin rakenteeseen kertyy vierasta materiaalia.

4.2.2 Läppäventtiili painevesilaitoksen syöttövesijärjestelmässä

Reaktorin syöttövesijärjestelmä syöttää höyrystimeen vettä sen käytön aikana voimalaitosprosessin käyttämiseksi. Tämän tyyppisessä järjestelmässä saatetaan käyttää yk-

sisuuntaventtiiliä estämään vastakkaissuuntainen virtaus syöttövesijärjestelmän pysähtyessä. Tämä tapahtuu esimerkiksi ajettaessa laitosta alas tai sellaisessa hätätilanteessa, jossa pysäytetään syöttövesijärjestelmä. Normaalikäytön aikana venttiili on siis auki ja sen läpi virtaa vettä. (Pershagen 1989)

Tässä tapauksessa on olennaista venttiilin stabiliteetin tarkastelu. Venttiilin värähtelevää liikettä tai sen painumista ääriasennon rajoittajaa vasten voidaan tarkastella sähkömagneettisen mittauksen tai ultraäänimittauksen avulla. Ensin mainittu antaa helpommin tulkittavissa olevan mittaustuloksen. Ultraäänimittauksen avulla voidaan kuitenkin tarkastella myös vierasesineiden tai lian kertymistä venttiiliin. Molemmilla mittaustavoilla voidaan myös saada tietoa venttiilin kulumisesta tai välyksistä. Akustisen emission mittaamisen mielekkyys riippuu siitä, mikä merkitys venttiilin mahdollisen vuodon tarkastelulle venttiilin sulkeutuessa katsotaan. Vesi molemmin puolin venttiiliä on tässä tapauksessa kuitenkin ”samaa” primääripiirin vettä.

5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa on käyty läpi eri venttiilityyppien rakennetta ja perehdytty venttiilityyppien potentiaalsiin ongelmiin. Voidaan todeta, että yksisuuntaventtiili voi vioittua varsin monilla erilaisilla mekanismeilla. Eri vikaoireet, vikatyypit ja niiden yhteyksien tunteminen ovat keskeisiä asioita venttiilien kunnonvalvonnan kannalta.

Tutkimuksessa on käyty läpi eri kunnonvalvontamenetelmien ominaisuudet. Voidaan todeta, että menetelmillä saatavat hyödyt eroavat täysin toisistaan. Akustisen emission mittaamisen keskeinen sovellus on vuodon havaitseminen. Myös joitakin venttiilin liikkeeseen liittyviä dynaamisia ilmiöitä voidaan havaita. Ultraäänimittauksen ja sähkömagneettisten mittausten menetelmien sovellukset sopivat venttiilin asennon ja liikkeen havainnointiin. Koska eri mittausten menetelmät antavat tietoa eri asioista, valitun kunnonvalvontamenetelmän on järkevää perustua venttiilin arvioituihin vioittumisriskeihin ja niiden aiheuttamiin vaikutuksiin järjestelmässä. Eri menetelmien soveltuvuutta on esitelty taulukossa 1.

	Akustinen emissio	Ultraääni	Sähkömagneettiset menetelmät
Epätäydellinen tiivistyminen (vuoto)	Soveltuu hyvin venttiilin vuodon havaitsemiseen.	Ei sovellu. Vuotoa ei voi havainnoida ja tarkkuus ei riitä asennon havaitsemiseen.	Ei sovellu. Vuotoa ei voi havainnoida ja tarkkuus ei riitä asennon havaitsemiseen.
Vierasesine- tai materiaali	Ei sovellu itse vierasesineen havaitsemiseen, mutta aiheutuva vuoto havaitaan.	Soveltuu, mutta vaatii signaalin tulkintaa.	Ei sovellu itse vierasesineen havaitsemiseen, mutta asentopaik- kema havaitaan.
Auki juuttuminen	Soveltuu vain kun virtaus aiheuttaa havaittavan akustisen emission.	Soveltuu. Venttiilin asento voidaan havainnoida.	Soveltuu. Venttiilin asento voidaan havainnoida..
Liikkuvien osien viat	Ei sovellu. Ei anna tietoa venttiilin osien kunnosta.	Soveltuu, mutta vaatii signaalin tulkintaa.	Soveltuu venttiiliin värähtelyn ja liikkeenopeuden valvontaan.

Taulukko 1. Eri menetelmien soveltuvuus erilaisten vikojen havaitsemiseen.

Ultraäänellä ja sähkömagneettisilla menetelmillä saadaan usein vastaavat tiedot. Mittausjärjestelyä suunniteltaessa on syytä tarkoin pohtia, kumpi menetelmä on relevantti kyseisen tapauksen mittaamiseen. Ja edelleen, onko toista näistä menetelmistä tarpeen hyödyntää, vai saadaanko vastaava hyöty pelkästään toisen menetelmän avulla.

LÄHTEET

(Lee et al. 2003) Lee J.H, Lee M.R. Kim J.T. Lak V.K., Condition monitoring of a check valve for nuclear power plants by means of acoustic emission technique, Proceedings of 17th international conference on structural mechanics, Prague, Czech republic, August 17-22. 2003,

(Lee et al. 2010) Lee Sun Ki, Kim Tae-Ryong, Lee Sang Gok, Park Sung-Keun. Degradation mechanism of check valves in nuclear power plants.

(McElhaney 1999) McElhaney, K.L. An analysis of check valve performance characteristics based on valve design, Nuclear engineering and design 197 (2000) 169-182.

(McElhaney 1997) McElhaney K.L, Failure modes and causes for swing and lift type check valves, Oak ridge national laboratory

(Haynes 1990) Haynes H.D, Aging and service wear of check valves used in engineered safety systems of nuclear power plants, NUREG/CR-4302 ORNL-6193.

(Kaewwaewnoi et al. 2009) Kaewwaewnoi W, Prateepasen A, Kaewtrakulpong P, Investigation of the relationship between internal fluid leakage through a valve and the acoustic emission generated from the leakage, measurement Volume 43, Issue 2, s. 274-282.

(NEA 2003) ICDE Project report: Collection and analysis of common-cause failure of check valve, NEA/CSNI/R(2003)15

(Lee et al. 2005) Lee H.L , Lee M.R., Kim J.T. Condition monitoring of a nuclear power plant check valve based on acoustic emission and a neural network, Journal of pressure vessel technology vol 127 s.230-236.

(JSNDI 2016) Japanese society for non-destructive inspection, Practical acoustic emission testing, ISBN 978-4-431-55072-3.

(Pershagen 1989) Pershagen B, Light water reactor safety, Pergamon press. ISBN 0-08-035915-9

(Areva 2013) Ultracheck C System. Advanced Non-Intrusive Diagnostics for check valves. Areva Inc.

(http://us.areva.com/home/liblocal/docs/Catalog/PWR/ANP_U_029_V4_13_ENG_UltracheckC.pdf)

